

УДК 621.928.8

*Є.Є. ВОЛКАНІН*, ст. викл., КНУ ім. М. Остроградського,  
Кременчук

## МАГНІТНА СИСТЕМА З ПОСТІЙНИМ ГРАДІЄНТОМ ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ НАНОЧАСТИНОК ЗА ФРАКЦІЯМИ

Розглянуто один з етапів виготовлення нанокомпозита для біомедичних застосувань, а саме сепарація наночастинок за фракціями. Визначено вимоги до магнітної системи. Моделювання методом кінцевих елементів дозволило встановити необхідні параметри магнітної системи.

**Ключові слова:** магнітна сепарація, феррогідростатична сепарація, нанокомпозит, наночастинок.

**Вступ.** Нанокомпозит для біомедичних застосувань є перспективним напрямом розвитку нанотехнологій. Його широкому впровадженню перешкоджає високовартісне виробництво. Один з етапів виробництва передбачає тривалий процес центрифугування, мета якого – отримання монодисперсної фракції наночастинок з яких складається нанокомпозит [1]. Магнітні наночастинок значно розрізняються за розмірами і як наслідок за магнітними властивостями, а саме магнітним моментом. Цей факт дозволяє припустити можливість розділення наночастинок за фракціями методами магнітної сепарації замість центрифугування.

**Аналіз попередніх досліджень.** Відомо, що сила магнітного поля прямо пропорційна його градієнту. Найбільш проста та ефективна система створення неоднорідного магнітного поля застосовується при визначенні магнітної сприйнятливості зразків за методом Фарадея [2]. Така магнітна система являє собою два полюси, торцеві площини яких нахилені під певним кутом один до одного (рис. 1 а, б).

Магнітна система Фарадея знайшла широке застосування в феррогідростатичних (ФГС) сепараторах, що призначені для відокремлення за щільністю матеріалів в магнітній рідині. Особливість сепараторів такого типу – наявність робочого середовища (магнітної рідини), яка розташована в міжполюсному проміжку магнітної системи [3-5].

ФГС сепаратори не призначені для сепарації таких матеріалів як нанокомпозит, але їх магнітні системи спроектовані для маніпуляції щільності магнітних рідин. Тобто магнітне поле ФГС сепаратора в певній мірі керує рухом наночастинок, із яких складається магнітна рідина. В даній роботі інтерес становить саме ФГС магнітна система, що здійснює вплив на наночастинок.

© Є.Є. Волканін, 2013

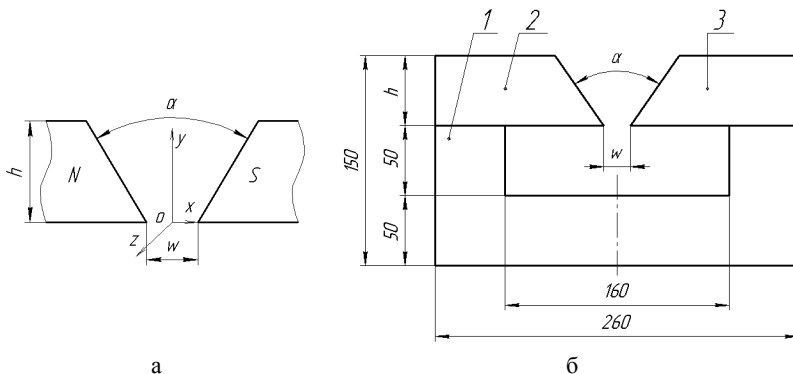


Рис. 1 – Магнітна система Фарадея: а – профіль полюсних наконечників; б – плоскопаралельна модель магнітної системи.

**Мета роботи.** Мета дослідження полягає у визначенні параметрів магнітної системи, подібної до системи ФГС сепаратора, для безпосередньої сепарації наночастинок за фракціями.

**Матеріал і результати досліджень.** Для здійснення сепарації наночастинок за фракціями необхідно щоб частинки різного розміру рухались за різними траєкторіями під дією магнітної сили. Магнітна сила, яка діє на наночастинку, дорівнює [6]:

$$F_m = \mu_0 V_p M_p \operatorname{grad} H, \quad (1)$$

де  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму, Н/м;  $V_p$  – об'єм магнітного ядра частинки, м<sup>3</sup>;  $M_p$  – намагніченість наночастинки, А/м;  $H$  – напруженість магнітного поля робочого проміжку, А/м.

Як видно з (1) на траєкторію частинки впливає її розмір, намагніченість та градієнт поля. Наночастинки різного розміру будуть рухатись за різними траєкторіями в тому разі, коли градієнт поля та напрям магнітної сили буде однаковим у всьому робочому проміжку, тому що магнітна сила буде залежати тільки від об'єму магнітного ядра частинки. Наночастинки повинні бути намагнічені до насичення щоб їх магнітний момент був пропорційний їх розміру. Для того щоб відокремити фракції в потоці розчинника напрям магнітної сили повинен бути направлений перпендикулярно напрямку потоку (вздовж вісі  $oy$ ).

Враховуючи вищезазначене сформулюємо вимоги до магнітної системи:

1. Напруженість магнітного поля в робочому проміжку повинна бути достатня для намагнічення наночастинок до насичення:

$$H \geq H_s, \quad (2)$$

де  $H_s$  – напруженість магнітного поля при якій наночастинки намагнічені до насичення, А/м.

2. Профіль полюсних наконечників повинен створити магнітне поле з наступними характеристиками:

$$\frac{dH}{dz} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{dH}{dy} = \frac{dH}{dh} = \text{const}; \quad (4)$$

$$\frac{dH}{dx} = 0. \quad (5)$$

Виконання (2) здійснюється шляхом застосування в магнітній системі постійних магнітів з високим енергетичним показником (до 400кДж/м<sup>3</sup> для магнітів Nd-Fe-B), що забезпечить необхідну інтенсивність поля в робочому проміжку сепаратора. Якщо напруженість поля виявиться недостатньою, то для подальшого збільшення намагніченості полюсів застосовуються електромагнітні або надпровідні електромагнітні системи. Сучасні надпровідникові електромагніти здатні генерувати поле до 20Т [7].

Умова (3), виключаючи торці магнітної системи, виконується для магнітних систем ФГС, у яких співвідношення

$$w/c > 5,$$

де  $w$  – відстань між полюсами, м;  $c$  – довжина міжполюсного проміжку вздовж вісі  $z$ , м (рис. 1, а).

Тому надалі в міжполюсному проміжку будуть розглядатися тільки плоскопаралельні поля.

Умови (4, 5) виконуються в певній області поля робочого проміжку. Але, на сьогоднішній день, не існує однозначної аналітичної залежності градієнта поля від форми полюсів. Наукова задача полягає у визначенні конструкції магнітної системи для створення поля з необхідною силовою характеристикою.

В останні роки завдяки прогресу швидкодіючих цифрових обчислювальних машин чисельні методи отримали широке застосування. Це дозволило дослідникам вирішувати задачі по визначенню різних фізичних полів з високим ступенем точності. Без використання ЕОМ такі розрахунки були б надзвичайно трудомісткі або взагалі неможливі [8]. Дослідження розподілу магнітного поля в робочому проміжку та оптимізація профілю полюсів магнітної системи Фарадея буде здійсню-

ватися чисельним методом кінцевих елементів з використанням пакета сучасних прикладних програм.

Плоскопаралельна модель магнітної системи виконана на основі постійних магнітів NdFeB (рис. 1, б). Основні параметри моделі:

- відносна магнітна проникність магнітопроводу (поз. 1 рис. 1, б)  $\mu_r=4000$  (електротехнічна сталь);

- намагніченість полюсів (поз. 2, 3 рис. 1, б)  $M=1000\text{кА/м}$  (намагніченість постійних магнітів NdFeB);

- оточуюче середовище – повітря (відносна магнітна проникність  $\mu_r=1$ );

- відстань між полюсами  $w=10\text{ мм}$ , висота полюсів  $h=50\text{ мм}$ .

Змінюючи кут розкриття магнітної системи ( $\alpha$ ) та відстань між полюсами ( $w$ ) проведемо дослідження зміни магнітного поля в робочому проміжку.

Магнітна система Фарадея створює в повітряному проміжку поле магнітних сил. Це поле складається із двох областей з зустрічно направленими силами, які прямо пропорційні градієнту поля (рис. 2). Максимальний градієнт спостерігається на лінії основи полюсів ( $h=0$ ). При збільшенні висоти  $h$  градієнт стрімко зменшується до нуля та змінює знак. Відповідно змінюється і напрям сили поля (рис. 2, 3). Вище лінії  $dH/dh=0$  градієнт від'ємний і, в залежності від кута розкриття, може спостерігатися ділянка  $dH/dh=\text{const}$ , при цьому сила поля направлена вниз. Область робочого проміжку з від'ємним градієнтом і буде досліджуватись в даній роботі, оскільки в ній можливо здійснити виконання умов (2)-(5).

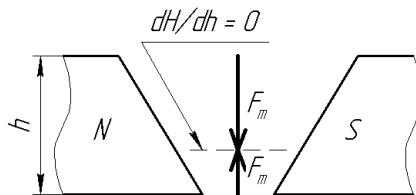


Рис. 2 – Напрям сил поля в робочому проміжку магнітної системи.

На графіку (рис. 3) наведені результати моделювання магнітних систем з різними кутами розкриття. Представлені графіки розподілу градієнта напруженості магнітного поля вздовж вертикальної осі ( $oy$ ).

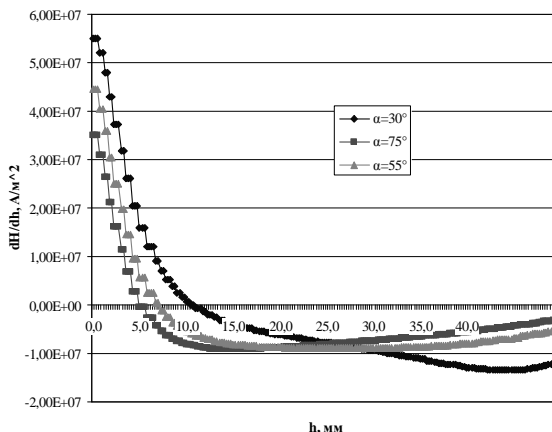


Рис. 3 – Розподіл градієнта напруженості магнітного поля між полюсами при кутах розкриття  $\alpha = 30^\circ, 55^\circ, 75^\circ$ .

При кутах розкриття  $\alpha=0^\circ \dots 40^\circ$  на ділянці  $h \approx 12,5 \dots 41,5$  спостерігається повільне зменшення градієнта напруженості із збільшенням відстані від основи полюсу, тобто умова  $dH/dh = \text{const}$  не виконується.

При кутах розкриття  $\alpha > 70^\circ$  на ділянці  $h \approx 10,5 \dots 50$  градієнт повільно збільшується, тобто умова  $dH/dh = \text{const}$  також не виконується. В діапазоні  $\alpha=50^\circ \dots 55^\circ$  на ділянці  $h \approx 15,0 \dots 39,0$  умова  $dH/dh = \text{const}$  практично виконується з достатньою, для задач сепарації, точністю.

Для дослідження впливу відстані між полюсами на розподіл магнітного поля зручно зміню значення відстані представити відношенням  $h/w$ . Представимо результати моделювання магнітних систем з кутом розкриття полюсів  $\alpha=55^\circ$ , намагніченістю  $M=1000 \text{ кА/м}$  і різною відстанню між полюсами  $h/w=10; 5; 2,5$  (при  $h=50 \text{ мм}$ ,  $w=5; 10; 20 \text{ мм}$ ) (рис. 4).

Аналіз графіків градієнта напруженості (рис. 4) при різних значеннях  $h/w$  дозволив зробити висновок, що віддалення полюсів магнітної системи призводить до збільшення однорідності поля в робочому проміжку та зменшення напруженості. Зближення полюсів збільшує значення напруженості та градієнта поля але при цьому зменшується поперечний перетин сепараційного каналу. Для сепарації наночастинок відношення висоти до міжполюсної відстані повинно знаходитися в межах  $h/w=5 \dots 10$  для забезпечення достатнього значення градієнта магнітного поля.

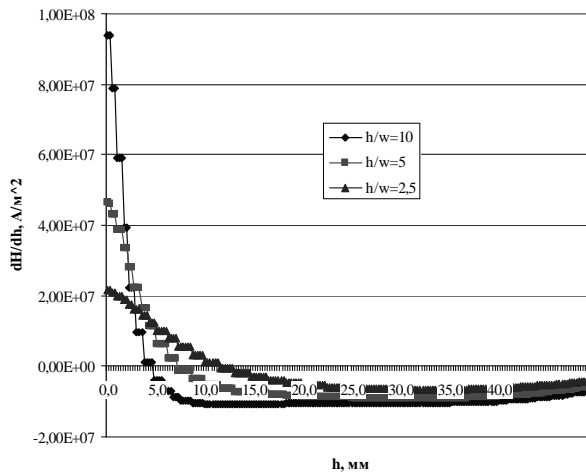


Рис. 4 – Розподіл градієнта напруженості магнітного поля при зміні відстані між полюсами.

Виконаємо моделювання магнітної системи для визначення розподілу напруженості поля по всій ширині робочого проміжку з метою перевірки умови (5). На рис. 5 представлені результати моделювання у вигляді екіпотенційних ліній напруженості магнітного поля (рис. 5,а), та у вигляді векторного поля магнітної сили (рис. 5, б). Моделювання показує, що в центральній частині робочого проміжку градієнт поля ( $dH/dx$ ) близький до нуля і магнітна сила направлена паралельно вісі  $oy$ . При наближенні до поверхні полюсів градієнт поля ( $dH/dx$ ) збільшується і напрям магнітної сили буде змінюватися (відхилятися від напрямку паралельного вісі  $oy$ ). Вказана зміна напрямку магнітної сили незначна та не вплине на результати сепарації.

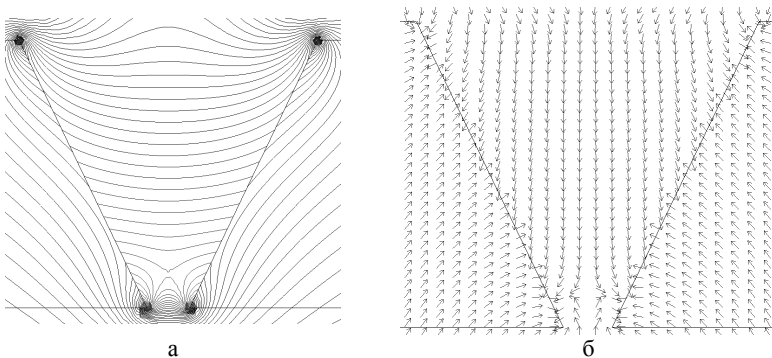


Рис. 5 – Візуалізація магнітного поля в робочому проміжку: а – напруженість магнітного поля представлена у вигляді еквіпотенціальних ліній; б – векторне поле магнітної сили.

Графік градієнта напруженості побудований вздовж вісі  $oy$  для магнітної системи з кутом розкриття  $\alpha=52^\circ$  показує ділянку постійного градієнта ( $dH/dh=\text{const}$ ) яка займає  $\sim 3/5$  висоти полюсів (рис. 6). Візуалізація магнітного поля (рис. 7,а) показує область постійного градієнта в центральній частині робочого проміжку. В цій частині доцільно розмістити сепараційний канал, як показано на рис. 7,б.

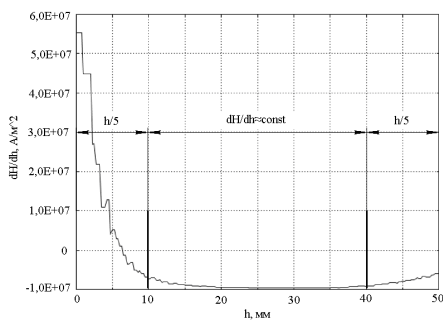


Рис. 6 – Розподіл градієнта напруженості магнітного поля вздовж вісі симетрії  $oy$ .

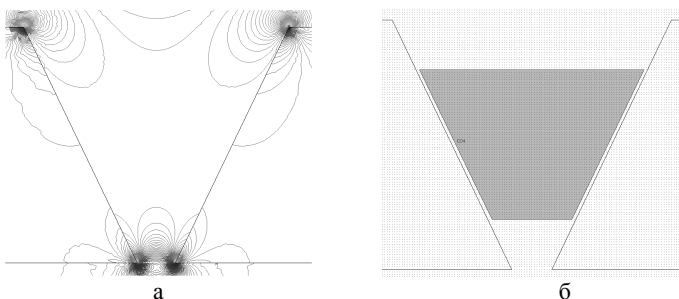


Рис. 7 – Робочий проміжок магнітної системи: а – градієнт напруженості магнітного поля представлений у вигляді екіпотенційних ліній; б – розташування сепарційного каналу в області постійного градієнта.

**Висновки.** 1. Сформульовані загальні вимоги до магнітної системи Фарадея, призначеної для сепарації за фракціями наночастинок.

2. Для дослідження магнітної системи найбільш ефективним і точним є метод кінцевих елементів з використанням пакета сучасних прикладних програм.

3. Визначений необхідний кут розкриття полюсів магнітної системи (який становить  $\alpha=50^\circ \dots 55^\circ$ ), при якому виконується умова  $dH/dh=\text{const}$  в певній області робочого проміжку.

4. Визначений вплив відстані між полюсами магнітної системи Фарадея на розподіл магнітного поля. Віддалення полюсів магнітної системи призводить до збільшення однорідності поля в робочому проміжку і зменшення напруженості. Встановлено, що відношення висоти полюсів до міжполюсної відстані повинно знаходитися в межах  $h/w=5 \dots 10$  для забезпечення достатнього значення градієнта магнітного поля.

5. Визначений розподіл магнітного поля по всій ширині робочого проміжку. В середній частині полюсів розподіл градієнта напруженості по ширині робочого проміжку буде мати той самий характер, що і розподіл вздовж вісі симетрії.

6. Встановлено, що робоча область повітряного проміжку магнітної системи займає  $3/5$  загальної висоти полюсів. В даній області з достатньою для практичного застосування точністю можна вважати, що магнітна сила однакова по модулю та за напрямом в будь який точці сепарційного каналу, та направлена перпендикулярно напрямку потоку.

**Список літератури:** 1. С.Л. Губин. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / Ю.А. Кокишаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков // Успехи



хи химии. – 2005. – № 74. – С. 539-574. 2. Кафедра физической и коллоидной химии Южного федерального университета "Методические указания к лабораторным работам по магнетохимии для студентов дневного и вечернего отделений химического факультета РГУ" / В.П. Курбатов. – 1993. – Режим доступа: [http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/special/magnetochem\\_3.html#311](http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/special/magnetochem_3.html#311). 3. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // Kluwer Academic Publishers. – 2004. 4. В.Н. Губаревич. Разделение материалов в магнитных гидкостях. Москва "Недра" – 1987. 5. Svoboda J. Densimetric separation of coal using magnetic fluids // Physical Separation in Science and Engineering. – 2004. № 13. – С. 127-139. 6. Owings P.C. High gradient magnetic separation of nanoscale magnetite // Kansas state university, Manhattan, Kansas. – 2011. 7. Промышленное оборудование для сепарации "Электромагнитные фильтры высокой интенсивности и высокоградиентные магнитные сепараторы". – Режим доступа: [http://mastermag.ru/separ\\_1.php](http://mastermag.ru/separ_1.php). 8. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов: Учебное пособие по курсу "Электромагнитные расчеты" Кафедра электромеханики МЭИ (ТУ) / В.Г. Фисенко. – 2002. – Режим доступа: <http://elmech.mpei.ac.ru/books/edu/ELCUT/index.html>.

*Надійшла до редколегії 21.03.2013*

УДК 621.928.8

**Магнітна система з постійним градієнтом для сепарації наночастинок за фракціями / Волканін Є.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 15 (988). – С. 122-130. Бібліогр.: 8 назв.**

Рассмотрен один из этапов производства нанокompозита для биомедицинского применения, а именно сепарация наночастиц по фракциям. Определены требования к магнитной системе. Моделирование методом конечных элементов позволило установить необходимые параметры магнитной системы.

**Ключевые слова:** магнитная сепарация, феррогидростатическая сепарация, нанокompозит, наночастицы.

One of the stages of production of nanocomposites for biomedical applications, namely, separation of nanoparticles by fractions is considered. The requirements for the magnetic system are determined. The Finite Element modeling is allowed to set the necessary parameters of the magnetic system.

**Keywords:** magnetic separation, ferrohydrostatic separation, nanocomposites, nanoparticles.